提高 NLOS 环境下定位精度的 TOA 数据处理方法

常 戎 吕善伟 张江林

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 基于移动通信环境中非视距 NLOS(Non-Line of Sight)传播时延扩展服从指数分布的特性,提出了提高波达时间 TOA(Time of Arrival)定位方法精度的一种数据处理方法. 该方法首先对 TOA 测量数据进行分析,从中剔除明显不合理、对定位精度没有贡献、甚至会增加定位误差的测量值,保留误差最小的 3 个,然后采用最小二乘 LS(Least Squares)法对移动台坐标进行估计. 仿真数据表明,该数据处理方法不但能够有效提高 NLOS 传播环境下 TOA 定位方法的精度,并对视距 LOS(Line of Sight)传播条件下的定位精度影响不大,具有较好的环境适应能力.

关 键 词: 数据处理; 最小二乘法; 非视距; 波达时间; 定位

中图分类号: TN 929.53

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0946-04

TOA data process method for improving the position location accuracy in NLOS environment

Chang Rong Lü Shanwei Zhang Jianglin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the statistical property of the non-line of sight (NLOS) propagation in the mobile communication environment, a data process method was presented to improve the position location accuracy of the time-of-arrival (TOA). All of the measured TOA data were analysed, and the data which were apparently non-reasonable and had no use to the location estimation, and even worsen the position location accuracy were eliminated, and the 3 data which had the minimum error were kept. The least-squares (LS) method was applied to evaluate the location of mobile station. The simulation results show that this data process method not only can effectively improve the position location accuracy of the TOA method in NLOS environment, but also has little disadvantage to mobile location in line of sight (LOS) environment. It has a good adaptability for the communication environment.

Key words: data process; least-squares method; non-line of sight; time of arrival; position location

1996 年美国联邦通信委员会(FCC)公布了 E-911 定位要求,从 2001 年 10 月起所有的移动网络运营商要为用户提供精度在 125 m 内的定位服务,并将定位服务作为今后第三代(3G)无线通信网络必备的基本业务[1]. E-911 所提出的定位要求引起了全球广泛关注,蜂窝移动通信系统中的无线定位研究成果不断涌现,但仍然存在许多问题急待解决,NLOS(Non-Line of Sight)传播效应就是其中之一[2].

在蜂窝移动通信系统中,常用测量信号波达时间 TOA(Time of Arrival)的方法对移动台进行定位. 对时间的测量精度决定了这种方法的定位精度,1 ns 的时延测量误差对应 0.3 m 的距离误差. TOA 测量误差主要由 2 部分组成,即系统测量误差和多径衰落、多址干扰、NLOS 传播以及远近效应等产生的误差. 系统测量误差服从高斯分

收稿日期: 2005-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60271012)

作者简介: 常 戎(1971-),男,陕西西安人,博士生, cgjrz@sina.com.

布,随着技术的发展会逐渐减小,而其他一些误差因素受电波传播环境的影响始终存在,NLOS 传播是其中的主要因素. 针对减小 NLOS 传播对 TOA 方法定位精度的影响,国内外已经进行了大量的研究,产生了卡尔曼滤波方法[3]、ML 和贝叶斯方法[4]、散射模型方法[5]、BF 参数方法[6]、高阶统计量方法[7]和 MUSIC 方法[8]等. 这些方法有的运算量大,有的需要增加系统存储容量,都会增加系统成本和复杂性.

本文基于移动通信环境中 NLOS 传播时延扩展服从指数分布的特性[9],提出了提高 TOA 定位方法精度的一种数据处理方法. 该方法首先对 TOA 测量数据进行分析,从中剔除明显不合理、对定位精度没有贡献、甚至会增加定位误差的测量值,保留误差最小的 3 个,然后再采用最小二乘法对移动台坐标进行估计.

1　TOA 时间测量基本模型

设移动台到第 i 个基站的信号波达时间为

$$t_{i,\mathrm{m}} = t_{i,\mathrm{LOS}} + t_{i,\mathrm{e}} + t_{i,\mathrm{N}} \qquad i = 1,2,\cdots,M \tag{1}$$

式中,$t_{i,\mathrm{LOS}}$是移动台与第 i 个基站间信号的视距传播时间;$t_{i,\mathrm{e}}$是系统测量误差,一般服从 0 均值的高斯分布;$t_{i,\mathrm{N}}$是由 NLOS 传播等引入的误差,可用服从指数分布、均匀分布及 Delta 分布的随机变量表示,本文仅考虑 $t_{i,\mathrm{N}}$服从指数分布[9]的情形,即

$$p(t_{i,\mathrm{N}}/\tau_{i,\mathrm{rms}}) = \begin{cases} \dfrac{1}{\tau_{i,\mathrm{rms}}}\exp\left(-\dfrac{t_{i,\mathrm{N}}}{\tau_{i,\mathrm{rms}}}\right) & t_{i,\mathrm{N}} \geqslant 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

式中,$\tau_{i,\mathrm{rms}} = t_1\, d_i^{\varepsilon}\xi$ 为传播时延扩展的均方根值;t_1 为 $\tau_{i,\mathrm{rms}}$在 $d_i = 1$ km 时的中值;d_i 为收发间的距离;指数 $\varepsilon = 0.5 \sim 1$;随机变量 ξ 服从对数正态分布.

由概率论可知,$t_{i,\mathrm{N}}$的概率密度函数为

$$p(t_{i,\mathrm{N}}) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t_{i,\mathrm{N}},\tau_{i,\mathrm{rms}})\,\mathrm{d}\tau_{i,\mathrm{rms}} = \begin{cases} \displaystyle\int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z\,\tau_{i,\mathrm{rms}}^2}\exp\left(-\frac{t_{i,\mathrm{N}}}{\tau_{i,\mathrm{rms}}} - \frac{(\ln\tau_{i,\mathrm{rms}} - m_z)^2}{2\sigma_z^2}\right)\mathrm{d}\tau_{i,\mathrm{rms}} & t_{i,\mathrm{N}} \geqslant 0 \\ 0 & t_{i,\mathrm{N}} < 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中,$m_z = \ln t_1 + \varepsilon\ln d_i$,$\sigma_z^2 = \sigma_\xi^2$. 容易得到 $t_{i,\mathrm{N}}$的各阶统计量:

$$E\left(t_{i,\mathrm{N}}^n\right) = n!\; t_1^n\, d_i^{n\varepsilon}\mathrm{e}^{n^2\sigma_\xi^2/2} \qquad n = 1,2,\cdots \tag{4}$$

从式(4)可以看出,NLOS 传播时延扩展的各阶统计量仅仅是通信距离的指数函数.

2　TOA 定位方法

如图 1 所示,假设平面上任意分布着 M 个基站,基站 i 测量的移动台(x, y)发射信号波达时间 TOA 值为 $t_{i,\mathrm{m}}$,且各个基站测量的结果相互独立.

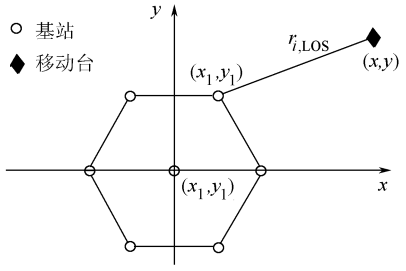


图 1　二维平面的蜂窝结构和移动台分布

设基站 i 的坐标为(x_i, y_i),有

$$\left.\begin{aligned} r_{i,\mathrm{m}}^2 &= (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \\ r_{i,\mathrm{m}} &= ct_{i,\mathrm{m}} \qquad i = 1,2,\cdots,M \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中,$r_{i,\mathrm{m}}$是通过测量 $t_{i,\mathrm{m}}$获得的两者距离测量值.

$r_{i,\mathrm{LOS}}$是各基站 i 与移动台间真实距离,由于系统测量误差的存在,有 $r_{i,\mathrm{m}} = r_{i,\mathrm{LOS}} + r_{i,\mathrm{e}}$,定义误差函数:

$$\varphi(i) = r_{i,\mathrm{m}}^2 - r_{i,\mathrm{LOS}}^2 = 2c^2 t_{i,\mathrm{LOS}} t_{i,\mathrm{e}} + c^2 t_{i,\mathrm{e}}^2 \tag{6}$$

当系统测量误差 $t_{i,\mathrm{e}}$相对较小时,可忽略误差函数中二次方项 $c^2 t_{i,\mathrm{e}}^2$,对 M 个基站式(6)可写成

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{h} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}} = 2c^2\boldsymbol{T}_{\mathrm{LOS}}\boldsymbol{t}_{\mathrm{e}} \tag{7}$$

由于 $t_{i,\mathrm{e}}$互不相关,误差函数的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\varphi}) = 4c^4\boldsymbol{T}_{\mathrm{LOS}}^2\boldsymbol{R}_{\mathrm{e}} \tag{8}$$

按照文献[10]的方法,可以得到移动台坐标的最小二乘估计:

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}} = \arg\min\left\{(\boldsymbol{h} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\cdot(\boldsymbol{h} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}})\right\} = \left(\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}\right)^{-1}\boldsymbol{G}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^{-1}(\boldsymbol{\varphi})\boldsymbol{h} \tag{9}$$

式(7) ~ 式(9)中各参数的含义具体参见文献[10]. 对式(9)中的 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}}$ 进行去相关处理,可以得到移动台坐标更好的估计结果,受篇幅所限不再赘述,详见文献[10]. 需要说明的是,该 LS 方法是在 LOS 环境下推导的,NLOS 引入误差均为零.

3　TOA 测量数据预处理方法

基站 i 的 TOA 测量值是 $t_{i,\mathrm{m}}$,不考虑误差因素,则移动台必然位于以该基站为圆心、$t_{i,\mathrm{m}}$为半径的圆周上,以下称之为定位圆 i. 在 NLOS 传播

条件下,由于 $t_{i,N}$ 是正偏置,并且一般比 $t_{i,e}$ 大很多,因此移动台必然在定位圆内部,位于任意3个定位圆的交汇区域,如图2所示. $t_{i,m}$ 越大可以认为测量误差越大,由3个TOA测量值最小者所得到的定位结果误差应该最小,如图2中定位圆BS1,BS2,BS3的组合.

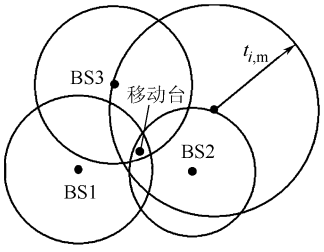


图2 基站坐标与TOA测量确定的移动台区域

此外,不考虑移动台的运动,在短时间内基站进行2次TOA测量,测量值越小可以认为测量误差也越小,如图3中BS2实线所示.

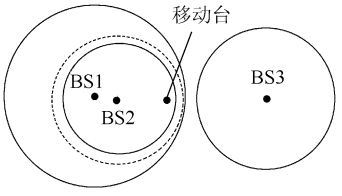


图3 定位圆完全覆盖、不相交的情况

由此得到对TOA数据进行预处理的原则:

1)至少保留3个基站的TOA测量值用于LS定位算法;

2)同等条件下优先保留小的TOA测量值;

3)若出现1个或多个定位圆被某个定位圆完全覆盖的情况,则可剔除覆盖范围较大者,如图3中的BS1;

4)若出现某2个定位圆相分离的情况,则二者均保留,如图3中的BS2,BS3;

5)若出现某个定位圆被其他的所有定位圆完全覆盖的情况,则所有的TOA测量值都保留.

按照以上原则,对TOA数据进行预处理的流程如下:

1)每个基站连续测量3次移动台TOA值,均保留最小值作为TOA测量值;

2)构造矩阵 $\boldsymbol{A}=\left(a_{ij}\right)_{M\times M}$, $a_{ij}=t_{i,m}-t_{j,m}$,基站序号 $i,j=1,\cdots,M$;

3)构造矩阵 $\boldsymbol{B}=\left(b_{ij}\right)_{M\times M}$, b_{ij} 是基站 i 和 j 间的距离所对应的电波传播时间,并取 $b_{ii}=1$;

4)记下矩阵 $\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}$ 中大于零的元素所在行、列,形成一个 $n\times 2$ 矩阵 $\boldsymbol{C}$,每行对应一对有覆盖的定位圆,第一列是覆盖者,第二列是被覆盖者;

5)统计第二列共有多少个不同元素,每个元素各有几个,若存在某个或某几个元素的个数大于3,则删除矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中该元素所在的行;

6)统计新的 $\boldsymbol{C}$ 中第一列有多少个不同元素,每个元素各有几个,若不同元素只有4个或更少,则可剔除它们对应的TOA数据,剩余的3个(或更多)TOA数据是有效数据;

7)若上一步统计的不同元素有4个以上,则首先从中挑出个数大于1者,并剔除对应TOA数据,然后按从大到小的顺序剔除剩余元素所对应的TOA测量值,保证最终剩余3个有效的TOA测量值;

8)利用剩余的TOA数据进行移动台定位.

需要说明的是,在LOS传播环境下仅存在系统测量误差,它服从零均值的高斯正态分布,因而移动台可能在定位圆的内部,也可能在其外部,定位圆交汇的方法所确定移动台的范围有一定误差.以上TOA数据预处理方法主要针对的是NLOS传播环境,用于LOS传播环境时对LS方法的精度有一定的影响,在系统测量误差不大的情况下,定位精度的降低不大,仿真例子中最大约20 m.

4 计算机仿真分析

4.1 仿真参数设置

如图1所示,基站1坐标(0,0),其他6个基站均匀分布在半径为 r 的圆周上,微蜂窝和宏蜂窝结构中 r 取典型值0.3 km,3.0 km;移动台坐标 (x,y),与原点的距离0.1~6.0 km;系统测量标准差取0.1 μs;按一般市区环境选取NLOS传播时延参数,即取 $t_1=0.4$ μs, $\varepsilon=0.5$, $\sigma_\xi=4$ dB;进行10 000次蒙特卡罗仿真计算均方根值.

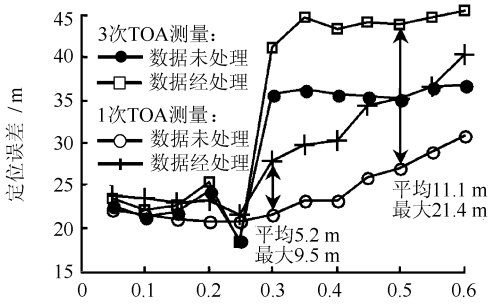
4.2 NLOS传播时延对TOA定位精度的影响

从图4的仿真结果可以看出,LOS传播环境下的LS方法的定位精度非常好,2种蜂窝结构中均不超过35 m;而在NLOS传播环境下随着通信距离的增加LS方法的定位精度迅速恶化,没有实际使用价值.

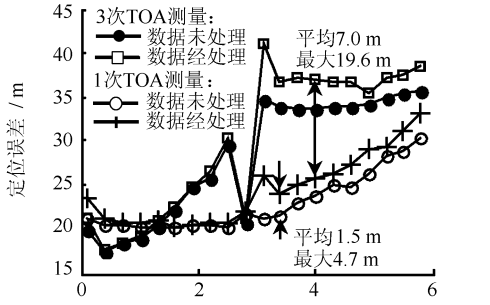
4.3 TOA数据预处理对定位精度的影响

在NLOS传播环境下,1次TOA数据预处理后的LS定位精度平均提高31.4 m(微蜂窝)、140.1 m(宏蜂窝),3次TOA数据预处理后的定位精度平均提高46.8 m(微蜂窝),158.7 m(宏蜂窝),TOA数据预处理的作用非常明显.

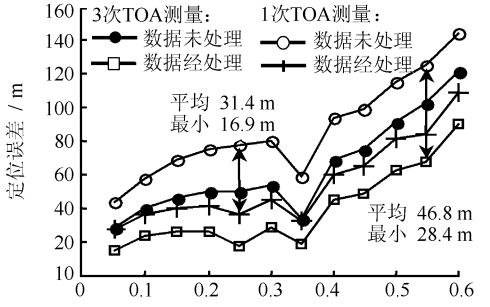
在LOS环境下,经过数据预处理后定位误差



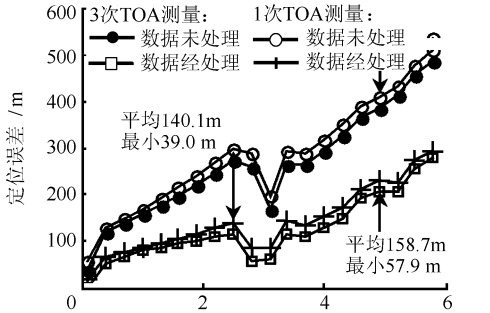
a　LOS 环境,r=0.3 km



b　LOS 环境,r=3.0 km



c　NLOS 环境,r=0.3 km



d　NLOS 环境,r=3.0 km

图 4　TOA 数据预处理对定位精度的影响

稍有增加,2 种预处理后的定位精度最大分别降低了9.5 m和21.4 m,仿真的结果与第3节的分析一致.此时由于误差的绝对值比较小,对实际的使用不会造成很大的影响.

5　结 束 语

通过理论分析和计算机仿真证明,本文提出的 TOA 数据预处理方法能够有效提高移动通信 NLOS 传播环境下 LS 方法的定位精度,在系统测量误差较小时也适用于 LOS 传播环境,有较好的环境适应能力.

参考文献（References）

[1] Rappaport T S, Reed J H, Woerner B D. Position location using wireless communications on highways of the future[J]. IEEE Communication Magazine, 1996, 34(10): 33-41

[2] Wylie M P, Holtzmann J. The non-line of sight problem in mobile location estimation[C]//Travers K. Proceedings of 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications. Piscataway: IEEE Press, 1996:827-831

[3] Thomas N J, Cruickshank D G M, Laurenson D I. A robust location estimator architecture with biased Kalman filtering of TOA data for wireless systems[C]//Proceeding of 6th IEEE International Symposium on Spread-Spectrum Technique & Applications. Piscataway: IEEE Press, 2000:296-300

[4] Jazzar S Al, Caffery J Jr. ML & Bayesian TOA location estimators for NLOS environments[C]//Proceedings of 55th IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1178-1181

[5] Ertel R B, Reed J H. Angle and time of arrival statistics for circular and elliptical scattering models[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(11): 1829-1840

[6] He Yan, Hu Hanying, Zhou Shan. A TOA based believable factor mobile location algorithm[C]//Jamalipour A. Proceedings of 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2004:260-263

[7] Liu Ying, Wang Shuxun. TOA estimation method using fourth order cumulants[C]//Yuan Baozong. Proceeding of 5th IEEE International Conference on Signal Processing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000:210-214

[8] Winter J, Wengerter C. High resolution estimation of the time of arrival for GSM location[C]//Kurata N. Proceedings of 51th IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2000:1343-1347

[9] Greenstein L J. A new path-gain/delay spread propagation model for digital cellular channels[J]. IEEE Transactions on VT, 1997, 46(2):477-484

[10] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915

(责任编辑:张　嵘)